

分立式色散补偿拉曼放大器增益特性 及非线性现象研究*

迟荣华¹⁾ 吕可诚¹⁾ 运 鹏¹⁾ 李乙钢¹⁾ 董孝义¹⁾ 陈文钊²⁾ 杨光明²⁾ 刘兆兵²⁾

¹⁾ 南开大学物理学院, 天津 300071)

²⁾ 深圳市飞通光电股份有限公司, 深圳 518057)

(2003 年 1 月 15 日收到, 2003 年 6 月 16 日收到修改稿)

分立式色散补偿拉曼放大器具有兼顾色散补偿和信号放大的特点, 在通信系统中展现出广阔的应用前景. 对反向抽运的 C 波段色散补偿分立式拉曼放大器的增益谱形状, 增益饱和及受激布里渊散射等特性进行了较为详细的实验研究.

关键词: 分立式色散补偿拉曼放大器, 增益饱和, 受激布里渊散射, 斯托克斯波

PACC: 4265, 4281

1. 引 言

光纤中的受激拉曼散射作为一种非线性效应引起人们的广泛关注. 以往主要研究受激拉曼散射对密集型波分复用系统 (DWDM) 中的信道串扰方面的影响^[1,2]. 近年来随着通信系统容量的快速增长, 对传输速率和带宽的要求越来越高, 传统的掺铒光纤放大器 (EDFA) 已不能完全满足需要, 带宽更宽、噪声指数更低的拉曼放大器成为系统扩容的关键技术.

拉曼放大器主要分为两大类: 分布式拉曼放大器和分立式拉曼放大器. 分布式拉曼放大器通常由几十公里长的传输光纤构成, 以其分布式放大、较低的噪声系数和放大器带宽取决于抽运源波长等优点在 DWDM 系统中起着越来越重要的作用^[3,4]. 分立式拉曼放大器通常由拉曼增益系数高的掺锗光纤构成. 色散补偿光纤 (DCF) 具有较高的掺锗浓度和较小的有效面积, 因而在较低的抽运功率下就可以得到较大增益, 补偿自身在链路中引起的损耗, 同时 DCF 光纤是现阶段最成熟的色散补偿技术, 因而分立式色散补偿拉曼放大器得到广泛应用^[5,6]. 在最新的 40Gb/s 的通信实验中, 全拉曼放大充分利用了这

两类拉曼放大器的优点得到了较好的结果^[7].

有关分立式拉曼放大器研究比较多的是它的色散补偿特性^[8,9]. 本文着重对色散补偿分立式拉曼放大器的增益谱、增益饱和及受激布里渊散射现象进行了详细的实验研究. 就作者所知, 对色散补偿拉曼放大器的增益饱和规律和受激布里渊散射 (SBS) 现象的研究, 目前尚未见到详细报道.

2. 实验装置

反向抽运的分立式色散补偿拉曼放大器结构如图 1 所示. 波长为 1435nm 和 1455nm 的两只半导体激光二极管 (LD) 由 1435/1455nm 抽运合波器 (WDM2) 耦合作为拉曼抽运单元. 实验所用的 DCF 光纤为 OFS 生产的 WBDK1360, 光纤长度为 15km. 在 1550nm 波长处, 插入损耗 (IL) 为 9.1dB, 总色散为 -1524ps/nm . 信号光源为符合 ITU-T 标准的 C 波段 40 信道的 DWDM 光源, 信号波长范围 1528.51nm—1560.50nm. DWDM 信号先经过电可调衰减器 1 (VOA1) 衰减到 -9dBm (EDFA 增益平坦和低噪声所需要的信号输入功率), 然后进入增益平坦的 EDFA (虚线框所示部分) 进行放大, EDFA 的输出功率最大可达 19dBm. 放大后的信号由电可调衰减器 2

* 国家自然科学基金 (批准号 60137010) 和天津市自然科学基金 (批准号 013602311) 资助的课题.

(VOA2)实现对拉曼放大器信号输入功率的调节.在拉曼放大器信号输入端和 DCF 光纤之间放置一个光纤环形器(CIR)用来观测反向的 SBS.拉曼开关增

益是在 1 端测量的.实验所用光谱仪(OA)型号为 ANDO AQ6317B,其最小分辨率为 0.01nm.

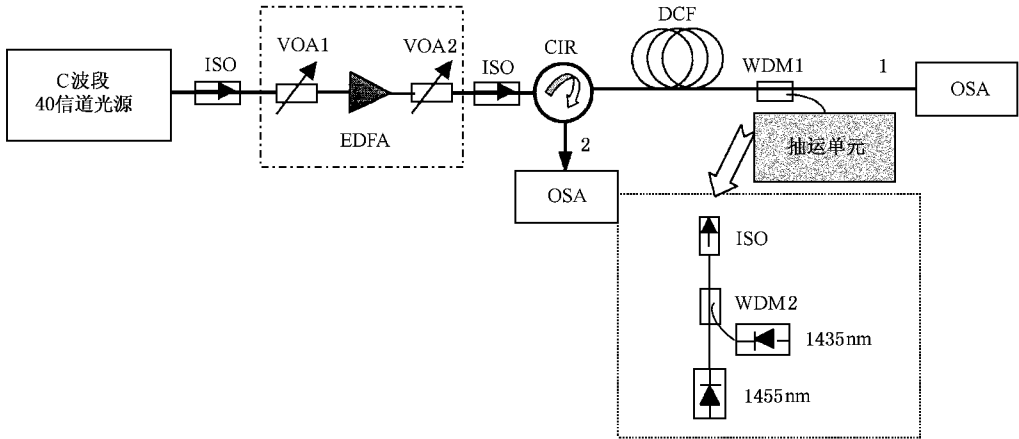


图 1 实验装置图

3. 实验结果及分析

抽运光与信号光同方向传输的正向抽运方式会将抽运光的幅度与偏振不稳定性引入到信号光中,严重影响信号质量^[10].因此目前大部分拉曼放大器采用反向抽运方式.本实验采用的是反向抽运方式,下面不再说明.

3.1. 增益谱

图 2 给出单波长抽运和双波长抽运的分立式拉曼放大器的增益谱.其中曲线 *a* 和曲线 *b* 分别为 1435nm 和 1455nm 单波长抽运时的拉曼增益曲线,曲线 *c* 为双波长抽运的增益曲线.对比 *a*、*b* 和 *c* 三条曲线说明,拉曼增益峰值是由抽运波长决定的,对于 1435nm 抽运光,增益峰值在 1535nm 附近,而对于 1455nm 抽运光,增益峰值在 1555nm 附近.同时说明,双波长抽运比单波长抽运能得到更宽更平坦的增益谱.曲线 *d* 为 *a* 和 *b* 两条曲线的人为叠加,从图中看出曲线 *c* 和 *d* 并不一致,曲线 *c* 前端的增益比曲线 *d* 小而后端比曲线 *d* 大,这正是抽运光之间的拉曼效应所致:当两个抽运光同时抽运时,短波长的功率转移给长波长,从而使短波长的增益减小,长波长的增益增加.

在双波长抽运的情况下,当 40 信道输入信号总功率为 0dBm 时,用光谱仪测出抽运功率不同时的拉曼增益谱(图 3,抽运功率分别在图中标出).此时

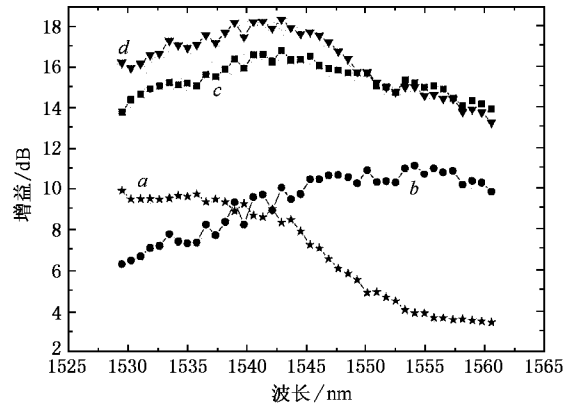


图 2 单波长和双波长抽运时的拉曼增益谱

信号经过光纤的全程损耗在 1550nm 处为 10.45dB.从图中可以看出,随着抽运功率的增加,拉曼增益增加,但是增益不平坦度也随之增加,从 1.2dB 增加到 3dB.当抽运功率为 200mW(1435nm)和 220mW(1455nm)时,拉曼增益达到 16.74dB.图 4 给出只有 1455nm 单波长抽运时,40 信道中的一个信道(1545.32nm)打开的拉曼增益与抽运功率的关系曲线,可以看到在较低抽运功率下拉曼增益与抽运功率呈线性关系.

3.2. 增益饱和特性

拉曼放大器在小信号工作区,增益与信号光输入功率的大小无关,恒为常数,但是当输入功率增大到超出小信号工作区时,拉曼放大器增益将随输入

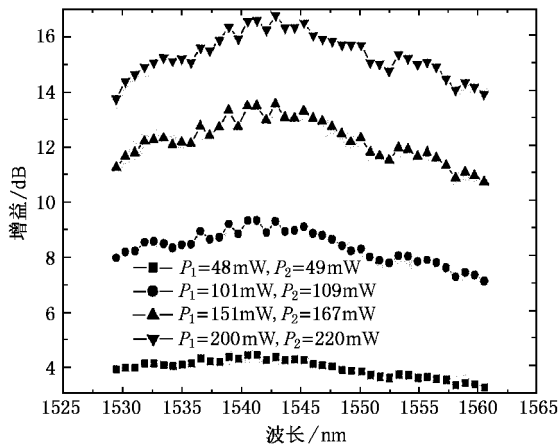


图3 抽运功率不同时的拉曼增益谱 ($P_s = 0\text{dBm}/\text{total}$)

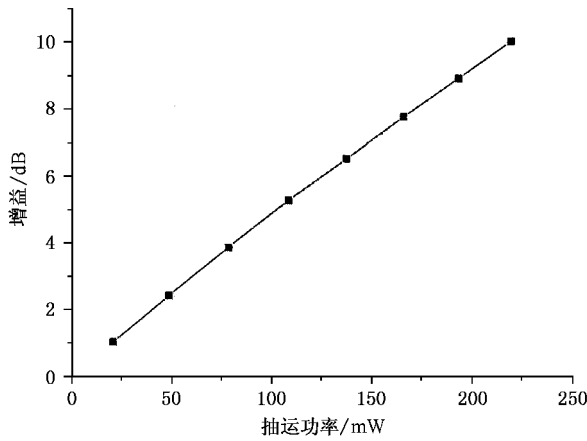


图4 拉曼增益随抽运功率的变化关系 ($\lambda_s = 1545.32\text{nm}$, $P_s = -8.27\text{dBm}/\text{ch}$)

功率的增大而减小,出现增益饱和现象.原因是当输入信号功率增大,抽运功率转移给信号而产生的消耗不可忽略时,抽运功率在传输过程中不断衰减,信号光的放大速率受到限制,放大过程出现了饱和现象.

我们对色散补偿分立式拉曼放大器的增益饱和特性进行了研究.图5给出抽运功率保持200mW(1435nm)和220mW(1455nm)不变,拉曼放大器输入信号功率从-10dBm逐渐增加到15dBm时的增益曲线.输入信号功率从-10dBm增加到0dBm时,增益谱没有明显变化,输入信号功率为4dBm时,增益略微有所减小,输入信号功率增加到15dBm时,拉曼增益显著减小,拉曼最大增益从18dB下降到13dB,增益饱和现象变得非常明显.该实验同时表明,在同时含有EDFA和分立式色散补偿拉曼放大器的传输

系统中,增益饱和是必须要考虑的因素.如果EDFA的输出功率比较高,色散补偿拉曼放大器一般不宜置于EDFA后面,而是应该放在EDFA之前.

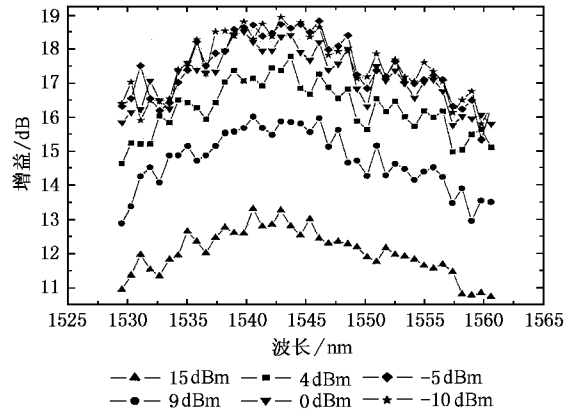


图5 分立式色散补偿拉曼放大器的增益饱和特性 ($P_{1435} = 200\text{mW}$, $P_{1455} = 220\text{mW}$)

图6给出1455nm单波长抽运,抽运功率分别为65mW,132mW,181mW,245mW时,拉曼增益随着输入信号功率的变化关系.从图中可以看出,当抽运功率一定时,在小信号工作区,增益与信号输入功率的大小无关,恒为常数,但是当输入信号功率增大到超出小信号工作区时,增益将随输入功率的增大而减小,呈现增益饱和的现象,而且抽运功率不同,饱和输入功率也不一样,抽运功率越高,饱和输入信号功率越低.当单波长抽运功率达到245mW时,饱和输入信号功率只有11.5dBm左右.随着抽运功率的继续增大,饱和输入功率还会继续减小,但是限于LD的最大输出功率,本文没有进行更高抽运功率的实验研究.

3.3. 受激布里渊散射

在研究图6单信号增益饱和时,随着拉曼放大器输入功率增加达到受激布里渊阈值,不可避免地出现SBS等非线性现象.SBS将把绝大部分输入功率转换为后向斯托克斯波,从而对光通信系统造成危害.虽然SBS与受激拉曼散射(SRS)类似,都是通过相对于入射抽运波频率下移的斯托克斯波的产生来表现的,然而它们之间存在着显著不同^[1].首先,光纤中由SRS产生的斯托克斯波向前后两个方向传输,而由SBS产生的斯托克斯波则仅有后向传输波;其次,SBS的斯托克斯频移(约10GHz)比SRS的频移小三个数量级.所有这些不同起源于它们的产

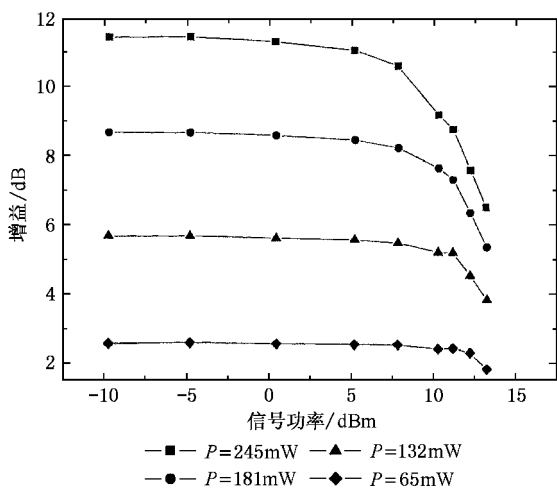


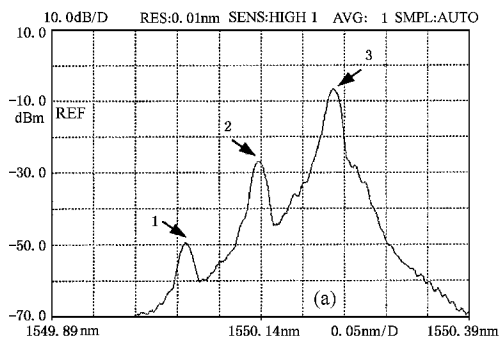
图6 增益随输入信号功率的变化($\lambda_s = 1545.32\text{nm}$)

生机理的基本差别,即SBS中参与的是声频声子而SRS中参与的是光频声子。

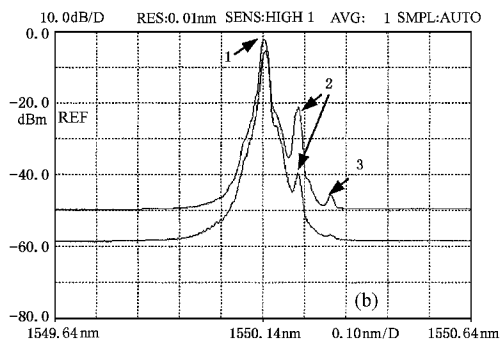
在单模光纤中,只有前后两个方向为相关方向,因此,SBS主要是后向斯托克斯波,其频移为 $\nu_B = 2nv_A/\lambda_p$,式中 n 为抽运波长 λ_p 处的折射率。若取声速 $v_A = 5.96\text{km/s}$, $n = 1.45$,则对石英光纤,在 $\lambda_p = 1.55\mu\text{m}$ 附近, $\nu_B = 11\text{GHz}$ (0.088nm)。

我们实验中详细地研究了分立式色散补偿拉曼放大器中出现的受激布里渊散射现象。实验中只有波长为 1550.142nm 的信号光打开,其余信道关闭,输入信号功率调整到 10dBm ,当拉曼抽运关闭时,用光谱仪在2端很清楚地观察到反向受激布里渊散射现象。图7(a)中峰1和3两个峰的中心波长为 1550.062nm 和 1550.222nm ,它们分别对应一级布里渊散射的反斯托克斯峰(相对于信号波长蓝移 0.080nm)和斯托克斯峰(相对于信号波长红移 0.080nm)。峰值 1550.142nm 的峰2是信号光的瑞利散射峰(瑞利散射通常发生在后向,但是波长不改变)。此时在信号输出端1端口获得的光谱如图7(b)中下面的曲线所示,该曲线上只有两个明显的峰值, 1550.142nm 和 1550.222nm (峰1和2),分别对应传输信号和一级布里渊散射光的瑞利散射。抽运功率增加或信号功率增加都能导致位于 1550.302nm (峰3)的二级布里渊-斯托克斯波的出现。这是因为随着抽运功率(或信号功率)的增加,一级布里渊-斯托克斯功率增加,而布里渊散射的阈值一般都很低^[11],当一级布里渊-斯托克斯功率增加达到二级布里渊散射阈值时,二级布里渊-斯托克斯波就会出现,其波长相对于一级布里渊-斯托克斯波继续

蓝移 0.080nm 。因为一级布里渊散射通常发生在后向,所以二级布里渊散射信号就出现在前向的信号输出端。图7(b)中上面曲线最右边的峰值即为二级斯托克斯波,此时拉曼抽运功率为 220mW (1455nm)。



(a) 后向观察到的SBS(拉曼抽运关闭) 峰1为一级反斯托克斯峰 2为信号光的瑞利散射峰 3为斯托克斯峰



(b) 前向观察到的SBS(bottom line:拉曼抽运关闭; top line: $P_{1455} = 220\text{mW}$) 峰1为传输信号 2为一级布里渊散射光的瑞利散射 3为二级布里渊-斯托克斯波

图7 分立式色散补偿拉曼放大器的SBS现象($P_s = 10\text{dBm}$, $\lambda_s = 1550.142\text{nm}$)

随着信号功率或抽运功率增加,分立式色散补偿放大器出现受激布里渊散射现象一方面使拉曼增益降低,另一方面后向传输的斯托克斯光给发射端提供了反馈,将引起激光器工作的不稳定,所以应该采取各种办法减小SBS的影响,例如增加信号光的线宽或对信号光进行高频调制。

4. 结 论

本文对C波段色散补偿拉曼放大器增益谱形的变化,增益饱和特性及受激布里渊散射等现象进行了详细的实验研究。研究结果对分立式色散补偿

拉曼放大器及其与 EDFA 构成的混合放大器的研制 与应用有重要的参考价值.

- [1] Gong J M *et al* 2000 *Acta. Phys. Sin.* **49** 449 (in Chinese) [巩稼民等 2000 物理学报 **49** 449]
- [2] Gong J M *et al* 2000 *Acta. Phys. Sin.* **49** 1287 (in Chinese) [巩稼民等 2000 物理学报 **49** 1287]
- [3] Nakamoto H , Tannaka T , Shimojoh N *et al OFC '2001 TuF6*
- [4] Emori Y , Tanaka K and Namiki S 1999 *Electron. Lett.* **35** 1355
- [5] Hansen P , Veselka G , Nielsen L and Stenz A J 1998 *Electron. Lett.* **34** 1136
- [6] Emori Y , Akasaka Y and Namiki S 1998 *Electron. Lett.* **34** 2145
- [7] Zhu Y , Lee W , Fludger C *et al OFC '2002 ThFF2*
- [8] Nielsen G Q Y and Bera P *et al OFC '2002 TuJ6*
- [9] Miyamoto T , Tsuzakj T and Okuno T *et al OFC '2002 TuJ7*
- [10] Forghieri F , Tkach R W , Chraplyvy R R *OFc '94 FC6*
- [11] Agrawal G P 1995 *Nonlinear fiber optics* , the second edition

Experimental research on gain characteristics and nonlinear effect of dispersion compensation Raman amplifiers^{*}

Chi Rong-Hua¹⁾ Lü Ke-Cheng¹⁾ Yun Peng¹⁾ Li Yi-Gang¹⁾ Dong Xiao-Yi¹⁾

Chen Wen-Zhao²⁾ Yang Guang-Ming²⁾ Liu Zhao-Bing²⁾

¹⁾ *Institute of Physics , Nankai University , Tianjin 300071 , China*

²⁾ *Shenzhen Photon Technology Limited Company , Shenzhen 518057 , China*

(Received 15 January 2003 ; revised manuscript received 16 June 2003)

Abstract

Discrete dispersion compensation Raman amplifiers (DCRA) are recently used in dense wavelength division multiplexing (DWDM) systems for compensating for both dispersion and fiber loss simultaneously. In this paper , the gain spectrum , gain saturation and the effect of stimulated Brillouin scattering (SBS) of DCRA have been experimentally investigated.

Keywords : discrete dispersion compensation Raman amplifiers (DCRA) , gain saturation , stimulated Brillouin scattering , Stokes wave

PACC : 4265 , 4281

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60137010) and the Natural Science Foundation of Tianjin , China (Grant No. 013602311).